

CONSTRUCTION OF FFAG ACCELERATOR COMPLEX IN KURRI

Minoru Tanigaki^{*A)}, Yoshiharu Mori^{A)}, Kaichiro Mishima^{A)}, Seiji Shiroya^{A)}, Makoto Inoue^{A)}, Shinji Machida^{B)},
Yoshihiro Ishi^{C)}, Shintaro Fukumoto^{C)}

^{A)}Research Reactor Institute, Kyoto University, 2-1010 Asashironishi, Kumatori, Osaka, 590-0494

^{B)}KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)}Mitsubishi Electric Corporation, 1-1-2 Wadasaki-cho, Hyogo-ku, Kobe 652-8555

Abstract

Kumatori Accelerator driven Reactor Test project (KART) has been started at Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI) from the fiscal year of 2002 and an 150 MeV proton Fixed Field Alternating Gradient (FFAG) accelerator complex is now under construction as a neutron production driver. We have succeeded the extraction of proton beam from the spiral sector type FFAG injector.

京大炉における FFAG 加速器システムの建設

1. はじめに

現在京都大学で稼働中の 5 MW 原子炉の後継中性子源としての加速器駆動未臨界炉による中性子源を提案^[1]以降、京大炉では加速器駆動未臨界炉の概念設計や臨界集合体 (KUCA) と 300 kV コッククロフト型加速器での基礎実験^[2, 3]が進められた結果、特に陽子エネルギーが 20~150 MeV の領域で実効増倍係数 k_{eff} の見積りに必要な核データや計算コードの精度が十分でない事が明らかになってきた。

一方、加速器駆動未臨界炉のための陽子ビーム源には 1) 高いビーム強度 2) 省電力 3) 高い安定性が求められる。大河によって 40 年前に提唱された FFAG 原理に基づく加速器^[4]はこれらの条件を満たす可能性を秘めているが、広帯域・高電圧の加速空洞がないこと、ビームの入出射に必要なスペースが確保できない事が妨げとなっていた。最近になって森らが FINMET を用いた広帯域高電圧加速空洞を開発^[5]し、500keV の FFAG 実証器で陽子加速に成功^[6]した。またビームの入出射に必要なスペースが十分に確保できる“ヨークフリー”マグネットの開発も行われ、これを用いた陽子 150MeV FFAG 加速器^[7]の建設が進められた。2005 年 3 月に初めてビーム取出に成功している。

このように FFAG が ADS の陽子ビーム源として実用化できる素地が整ってきた事をうけ、KART プロジェクトが文部科学省によって採用され 2002 年より開始された。このプロジェクトの目的は最近の技術開発を元にして実用機としての 150MeV 陽子 FFAG 加速器の開発をすること、及びこの加速器と KUCA を組み合わせ陽子エネルギー 20~150 MeV の領域での実効増倍係数決定に必要な核データや炉物理の実験を行う事である。ここでは KART プロジェクトで現在製作中の FFAG 加速器システムの概要と現状を報告する。

* E-mail: tanigaki@ri.kyoto-u.ac.jp

2. FFAG 加速器システム

今回の加速器システムは、入射器、ブースタ、主加速器の 3 段構成で全てが FFAG 加速器である。うち入射器が誘導加速を採用したスパイラルセクタ型の FFAG、残りが RF 加速によるラディアルセクタ型 FFAG で、最大エネルギー 150 MeV、繰り返し周波数 120 Hz のパルス運転を行う。今回の FFAG 加速器群の構成を図 1 に、仕様を表 1 にまとめる。

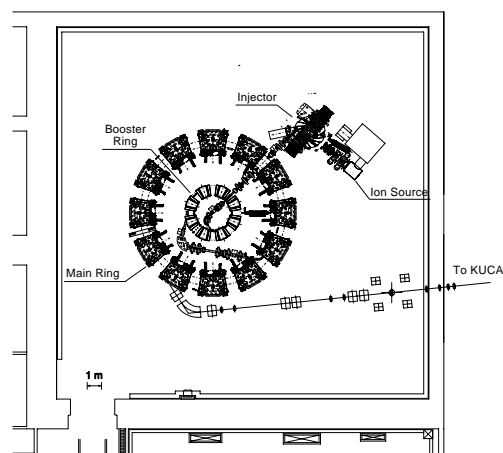


図 1: FFAG 加速器の配置図。

2.1 イオン源

イオン源は典型的な体積カスプ型イオン源を採用している。ここで発生させた H^+ イオンは 100 keV まで加速され入射器へと向かう。今回の FFAG はパルスモードで動くため、イオン源のアーケ電圧も 10% のデューティでパルスして効率化をはかっている。入射器への輸送ビームラインの途中には静電チョップが置かれ、このチョップで ~ 50 μ s にパルスを整えた上で次段に入射させる。

表 1: FFAG 加速器の仕様。

	Injector	Booster	Main
Focusing Acceleration	Spiral Induction	Radial RF	Radial RF
k	2.5	2.45	7.6
E_{inj}	100 keV	2.5 MeV	20 MeV
E_{ext}	2.5 MeV	20 MeV	150 MeV
P_{ext} / P_{inj}	5.00	2.84	2.83
r_{inj}	0.60 m	1.27 m	4.54 m
r_{ext}	0.99 m	1.86 m	5.12 m

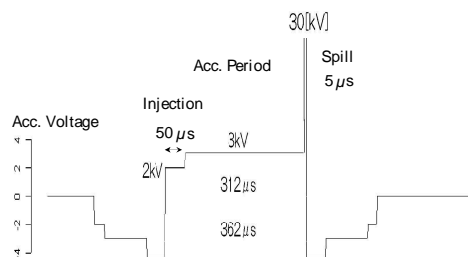


図 4: FFAG 入射器の加速電圧パターン。

2.2 誘導加速型 FFAG 入射器

入射器には誘導加速型 FFAG 加速器を採用した。FFAG 磁場は 12 個のスパイラル型電磁石 (スパイラル角 42 度) と、それぞれに 32 個取り付けられたコイルによって作られる。コイルの電流値を変えることで k 値の変更が可能で、加速エネルギーを 400 keV から 2.5 MeV の間で可変可能である。FFAG 入射器およびイオン源の概観を図 2 に、スパイラル型電磁石へのコイルの実装の様子を図 3 に示す。

この FFAG 加速器の誘導電圧のパターン (図 4) に示すとおり、イオン源から入射したビームバンチは $5\mu\text{s}$ に圧縮されて出射される。

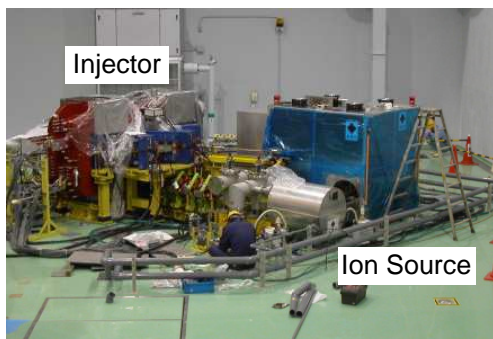


図 2: イオン源および FFAG 入射器の外観図。



図 3: FFAG 入射器のスパイラル型磁極に取り付けられた FFAG 磁場生成用コイル。

2.3 RF 加速型ブースター FFAG

入射段から入射した陽子ビームは、このブースター段の FFAG 加速器で最大 20 MeV まで加速される。この FFAG 加速器はラディアルセクタ型で、8 組の発散 (D) - 収束 (F) - 発散 (D) 電磁石からなる。D 電磁石の外側には漏れ磁束を抑えるための磁気シールドが用意されている。この電磁石の形状を図 5 に示す。FFAG 磁場の k 値は固定で 2.45 であり、磁極のカーブによって定められている。

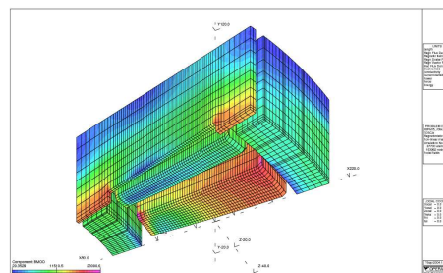


図 5: ブースター段の電磁石。電磁石の上半分を F 電磁石の中央で分割して描いている。D 電磁石の外側には磁気シールドが設置されている。

2.4 RF 加速型終段 FFAG

最終段の FFAG 加速器は RF 加速でラディアルセクタ型の FFAG 加速器である。基本的に KEK で開発中の 150 MeV 陽子 FFAG 加速器 [7] と同一である。電磁石も KEK の“ヨークフリー”タイプと基本的に同一であるが、外周面にリターンヨークの追加も可能な構造になっている。製作された最終段用 FFAG 電磁石を図 6 に示す。将来最高エネルギー 200 MeV で繰り返し周波数 1 kHz を目指せるよう、高周波加速空洞の追加を考慮した機器配置やより透磁率の高い鉄をヨークに使っている。加速空洞には FINEMET を使用し、広帯域で $\sim 10\text{ kV}$ 程度の出力電圧を確保している。

3. 現状と今後の予定

イオン源本体と FFAG 入射器は 2005 年 5 月に搬入・組立が行われた。加速器室の様子を図 7 に示す。

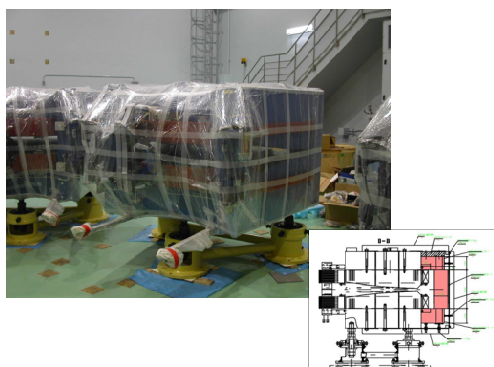


図 6: 京大炉 150MeV 陽子 FFAG 加速器の電磁石。基本的には KEK 150 MeV FFAG 加速器の電磁石と同じであるが、図のピンクの部分のようにリターンヨークがつけられる構造になっている。

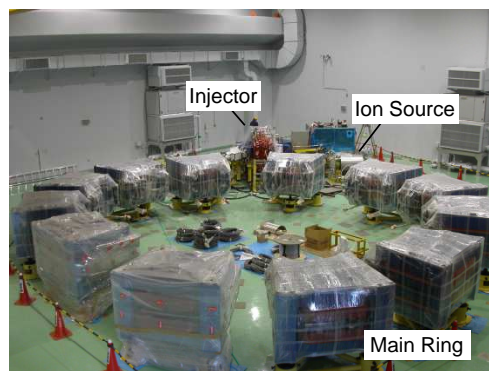


図 7: 加速器室内の様子。手前側に環状に並んでいるのが終段 FFAG 加速器用電磁石で、その奥に FFAG 入射器とイオン源が設置されている。

6月より FFAG 磁場生成コイルを装着しない形での加速試験を行った。この時イオン源からの入射エネルギー 100keV に対し加速後の取り出しエネルギーは 250keV となる。6月13日に初めて誘導加速に成功し、14日にビーム取出に成功した(図8)。加速電圧は入射時の $7\mu\text{s}$ は 2.6 kV、加速中の $120\mu\text{s}$ は 0.9 kV、取り出し時の $7\mu\text{s}$ は 2.6 kV というパターンであった。コア電源は 120 Hz サイクルで運転し、イオン源からのビームは 1 Hz 周期で入射した。入射を間引いたのは放射線管理上の理由である。入射ビーム電流 0.25 mA に対し出射ビーム電流 0.12mA が得られた。今後は引き続き FFAG 磁場生成コイルの実装や調整、コア電源の調整を行い、当初の入射器の定格である最大 2.5 MeV までの加速試験を行う予定である。

終段の FFAG 加速器の電磁石はすでに完成して加速器室内に搬入済みであり、現在チェンバーや加速空洞などの製作が進められている。またブースター段の電磁石も設計は終了しており現在順次製作中である。2005 年秋以降製作中の機器が順次搬入され、FFAG 加速器システム全体の組立・加速試験を行う予定である。同時に KUCA と加速器システムとのビームライン建設を進め、全体の完成の後に加速器駆動未臨界炉に関する基礎研究を開始する予定である。

なお、この発表は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、京都大学が実施した平成 16 年度『FFAG 加速器を用いた加速器駆動未臨界炉に関する技術開発』の成果である。

参考文献

- [1] K. Kawase and M. Inoue, "Neutron Factory Project at KURRI", APAC 1998, Tsukuba, Japan, p. 104
- [2] S. Shiroya, H. Unesaki et al., "Neutronics of Future Neutron Source Based on Accelerator Driven Subcritical Reactor Concept in Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI)", Int. Seminar on Advanced Nucl. Energy Systems toward Zero Release of Radioactive Wastes, 2nd Fujiwara Int. Seminar, Nov. 6-9, 2000, Shizuoka, Japan, Abstracts p. 58.
- [3] S. Shiroya, H. Unesaki et al., Trans. Am. Nucl. Soc., 2001

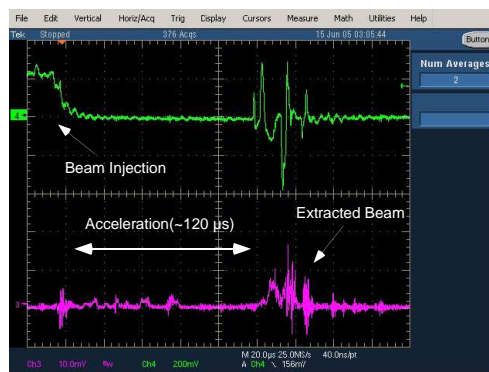


図 8: FFAG 入射器加速試験時に観測されたビーム。緑色の波形はイオン源からの入射ビーム、マゼンダ色の波形が FFAG 入射器のビーム取り出し口から約 1m の位置に設置されたファラデーカップの電流値。

Annu. Mtg., June 17-21, 2001, Milwaukee, Wisconsin, p. 78.

- [4] T. Ohkawa, Proc. of annual meeting of JPS(1953)
- [5] Y. Mori et al., "A new type of rf cavity for high intensity proton synchrotron using high permeability magnetic alloy", EPAC 1998, p. 299.
- [6] M. Aiba et al., "DEVELOPMENT OF A FFAG PROTON SYNCHROTRON", Proceeding of EPAC 2000, Vienna, Austria, p. 581
- [7] T. Adachi et al., "A 150MeV FFAG SYNCHROTRON WITH "RETURN-YOKE FREE" MAGNET", PAC 2001, Chicago, the United States, p. 3254
- [8] M. Aiba et al., "Beam Injection and Extraction in 150 MeV FFAG", Proceeding of EPAC 2002, Paris, France, p. 1076